



海底間音響測距観測に基づくプレート間運動に関する研究

著者	山本 龍典
号	88
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	理博第3268号
URL	http://hdl.handle.net/10097/00128521

論文内容要旨

(NO. 1)

氏 名	山本 龍典	提出年	令和 元年
学位論文の 題 目	海底間音響測距観測に基づくプレート間運動に関する研究		

論文目次

謝辞

概要

目次

略称一覧

第 1 章 序論

- 1.1 海底断層直接観測の意義
- 1.2 海底測地観測
 - 1.2.1 海底圧力計を用いた観測
 - 1.2.2 GNSS-音響結合方式による観測
 - 1.2.3 その他の海底測地観測
- 1.3 海底間音響測距観測
- 1.4 本研究の目的・構成

第 2 章 海底間音響測距の手法

- 2.1 観測手法
 - 2.1.1 直接音響測距
 - 2.1.2 間接音響測距
- 2.2 解析手法
 - 2.2.1 直接音響測距
 - 2.2.2 間接音響測距

第 3 章 マルマラ海・北アナトリア断層における観測

- 3.1 はじめに
- 3.2 直接音響測距観測と得られたデータ
- 3.3 解析結果
- 3.4 議論
 - 3.4.1 陸上 GNSS 観測と併せた断層モデルの検討
 - 3.4.2 他の測地観測との比較
 - 3.4.3 微小地震観測との比較

- 3.4.4 繰り返し地震観測との比較
- 3.4.5 海底バブル湧出活動との関連性
- 3.4.6 歪蓄積に関する考察と今後の観測の展望

3.5 まとめ

第4章 日本海溝における観測

4.1 はじめに

4.2 宮城県沖における観測

4.2.1 観測概要

4.2.2 解析結果

4.3 福島県沖における観測

4.3.1 観測概要

4.3.2 直接音響測距の解析結果

4.3.3 間接音響測距の解析結果

4.4 議論

4.4.1 宮城県沖の観測に関する議論

4.4.2 福島県沖の観測に関する議論

4.4.3 東北沖地震の余効すべりに関する総合的議論

4.4.4 観測の技術的な議論

4.4.5 間接音響測距の解析に関する議論

4.5 まとめ

第5章 議論

5.1 精度評価

5.2 海底間音響測距観測の課題

5.3 間接音響測距に関する課題と展望

5.4 今後の観測に向けた提言

第6章 結論

参考文献

論 文 要 旨

内部変形や間欠的な変動のあるプレート境界の挙動を明らかにするには、その場での直接計測が必要である。サンアンドレアス断層の横ずれ定常クリープ、アイスランドの北東部では間欠的な変動発散は、陸上で目にするのできる良く知られた例である。しかし、巨大地震を発生させるプレート境界のほとんどは GNSS や InSAR 等の宇宙測位技術が適用できない海底に存在するため、海底測地観測が必要となってくる。本研究では、海底測地観測の中でも、断層等の局所的な運動を直接捉えることができる海底間音響測距を用いて、プレート境界の挙動を明らかにした。

海底間音響測距は、海底に設置した機器 (PXP) 同士、もしくは係留された機器 (IPN) との間で音波の送受信を定期的に行い、その走時データと海中音速から基線長を算出することで、基線上の局所的変動を検出する手法である。前者は直接音響測距 (DPR)、後者は間接音響測距 (IPR) と呼ばれる。DPR は同時に計測する温度や圧力に基づく適切な海中音速の推定や機器の海底での設置姿勢の時間変化の補正が計測精度向上の鍵となる。一方、IPR はこれらの補正に加え、任意の動きをする IPN の位置も同時推定する必要がある。IPN を船舶からの吊り下げによる制御下で必要なだけ動かすことのできる既往の IPR 観測に対し、本研究では海底から係留された動きの小さい IPN の場合でも扱える定式化への拡張を試みた。海中音速勾配下での波線計算の導入、IPR 測距データによる各 PXP 位置の再決定、PXP 設置範囲内での各プレートの剛体性の仮定、時間変化しないプレート間運動速度の仮定により、IPN が 1 台、PXP が 4 台以上の組み合わせで、IPN の位置の推移と同時にプレートの運動速度が推定可能なことを見出した。また、実際の観測を通して、約 1 cm/yr の精度でプレート境界の変形を捉えられることを実証した。係留式の IPR は長期連続観測が可能で、音響パスの直達条件の制約を受けずにより広域への観測網の延長が可能な極めて有望な手法である。

観測は、トルコ共和国北部の北アナトリア断層 (すれ違い境界) と、東北沖の日本海溝 (収束境界) で実施した。トルコ北部を横断する北アナトリア断層 (NAF) は、アナトリアプレートとユーラシアプレートの境界で、歴史的に M7~8 クラスの地震が頻発している。断層の大部分が陸上に露出しており、InSAR 等の観測により、すべり速度の空間的不均質が報告されている。一方で、イスタンブールの南では、NAF はマルマラ海の下に位置しており、そのすべりの様子は不明である。この地域では、過去 100 年又は 250 年、M7 以上の地震は発生しておらず、約 25 mm/yr のブロック運動速度のうち、どの程度のすべりが欠損しているかは次の地震の規模を予測する上で不可欠な情報である。本研究では、マルマラ海の西部で DPR 観測を 2.5 年に渡り実施し、北アナトリア断層のすべり速度を調べた。音響パスの通った NAF を跨ぐ 4 基線と NAF 沿いの 1 基線のうち前者 4 基線について、それぞれで得られた短縮・伸長レートを断層と各基線の交差角に応じてすべり速度に投影し、 10.7 ± 4.7 mm/yr の右横ずれすべりが求められた。これは、ブロック運動速度の半分程度の値である。マルマラ海周辺の GNSS 観測データや、海底地震計による微小地震観測データも加味して、地表のすべり速度を本研究より 10.7 ± 4.7 mm/yr、地下 8–11 km を微小地震観測から非地震領域として完全固着、それより深い領域では微小地震が活発であるのでクリープとして、半無限均質媒質の断層モデルで計算した地表変位速度は、陸上 GNSS 観測データをよく説明できている。しかし、地表まで完全に固着しているモデルでも GNSS データを説明できるため、固着深度まで論じるためには、DPR 観測の他より断層に近い GNSS 観測点のデータが必要であることがわかった。一方、固着の空間分布に着目すると、マルマラ海の中中部での他機関による DPR 観測で完全固着を示す結果が報告されている。また、繰り返し地震の活動は西側で活発な一方、中部から東部

にかけては見られないことが報告されており、いずれもマルマラ海下の NAF が西側で固着が弱く、東側で強いという結果を支持するものであった。

東北沖の太平洋プレートと北米プレートの収束型境界である日本海溝では、2011 年東北地方太平洋沖地震後、余効変動が発生していることが複数の測地学的研究から明らかになっている。特に、GNSS-音響結合方式による観測 (GNSS-A) では、粘弾性緩和による宮城県沖での陸向きの動きを捉えることに成功している。この一方で、プレート境界浅部の余効すべりの実測は実現していなかった。本研究では、宮城県沖と福島県沖で日本海溝を跨いだ海底間音響測距観測を実施し、浅部余効すべりの実測を目指した。宮城県沖では、2013-2016 年に計 3 年間の DPR 観測を行い、5 本の基線で海溝軸を跨ぐ計測に成功した。全期間のデータを一括して海陸のプレート間運動速度を求めた結果、 0.02 ± 0.17 cm/yr となり、有意な相対運動の進行は認められなかった。近傍の GNSS-A 観測による陸向きの変動と合わせて解釈すると、宮城県沖のプレート境界浅部ですべりが生じていないことが示唆される。また、DPR 観測の近傍のプレート境界掘削調査や反射法地震探査では、地震時すべりが海溝軸まで抜けて動的弱化が発生していたと考えられているが、地震後すべりが発生していないことは、地震時すべりにより宮城県沖のプレート境界浅部での応力が完全に解放されたことと整合し、従来の断層挙動に関する考えを強く支持する。一方、福島県沖では、2017-2018 年の 1 年間、DPR/IPR を組み合わせた観測を行った。DPR 観測では 1 基線で海溝軸を跨ぎ、IPR 観測では全ての基線でパスが通った。DPR 観測の 1 基線からは 3.8 ± 0.8 cm/yr の短縮速度が求められた。IPR 観測では、先に述べた本研究で開発した解析方法を適用し 3.7 ± 1.1 cm/yr の短縮速度が得られた。福島県沖では、やや陸よりの GNSS-A 観測点では太平洋プレートに対して 13 cm/yr 程度で海向きの変位速度が得られており、この領域の陸側プレート内では非常に大きな変形が進行している。こうした大きなプレート内変形には、プレート境界断層だけでなく、そこから浅部側に延びる複数の分岐断層においても顕著な非地震性すべりが寄与している可能性がある。地震後に顕著なすべりが継続していることから、これらの断層は速度強化特性を示しているものと解釈される。

本研究により、海底のプレート境界の運動が、すれ違い型、収束型でそれぞれ実測され、海底間音響測距の実用性が実証された。また、NAF では地震間、日本海溝では地震後と、地震サイクルにおいても異なる時期の挙動を見ることができた。今後は、異なる海域で同様の観測を行うことにより、プレート間の挙動や巨大地震サイクルの解明が期待される。

論文審査の結果の要旨

提出された論文は、海底間音響測距と呼ばれる観測手法をプレート境界に適用し、トルコ・マルマラ海の北アナトリア断層のクリープ運動を検出するとともに、東北沖地震後の日本海溝の沈み込み帯先端部の、地震時のすべり量が大きく異なる2箇所での挙動をそれぞれ捉え、プレート間固着の性質の違いを明らかにしたものである。さらに、機器の設置場所に制約が多かった同手法を、任意の場所に展開可能な観測形態に発展させ、その形態特有のデータ解析方法を提案し、実観測を基にその有効性を実証した。

被害地震が頻繁に発生しているトルコの北アナトリア断層沿いで、地震の空白域となっているイスタンブール近郊のマルマラ海の海底断層の動きを、修士論文での研究をアップデートする形で、2年半にわたる海底間音響測距観測データで計測した。その結果、大局的なプレート運動の約半分に相当する1cm/yrのクリープを見出し、周囲の陸上GPSデータと合わせて断層モデルを構築した上で、そのすべり欠損レートに基づき、差し迫っているイスタンブール近郊の地震の大きさをM7.5程度と見積もった。

また、2011年の東北沖地震に関連した観測では、地震時に大きく断層がすべった宮城県沖と、顕著なすべりの無かった福島県沖の海溝軸付近の、地震後の挙動の対比に着目した観測を行なった。宮城県沖では2016年までの計3回の観測から、海溝軸での短縮がほとんど無いことを見出した。これは海溝型の沈み込み現場での動きを直接計測した世界で初めての例である。付近の地震後の掘削調査による断層面の岩石の物性、孔内温度計測・応力推定、さらに地震前後の反射法地震探査の結果等と合わせて、宮城県沖の沈み込み浅部は、地震時に大きくすべり、地震後はほとんど動いていない「動的弱化」の領域であると結論付けた。

一方、海陸の既存のデータから地震後の余効すべりが予測されている福島県沖では、海溝軸部分で3.8cm/yr、さらに、新たに開発した間接方式の観測でも、ほぼ同等の3.7cm/yrの短縮レートを検出した。この結果と、陸寄りのGNSS音響観測による13cm/yrの動きとの違いから、余効すべりの多くの部分が、反射法地震探査で両者の間に見られている複数の分岐断層で解消されていることを見出し、この部分の断層の性質を「速度強化」として、場所によるプレート間固着の違いをその場計測により明らかにした。

また、この福島県沖の観測で導入した間接方式の海底間音響測距は、地形との干渉で海底の機器同士で直接音が届かない場合でも、途中に高く係留した中継機を介することで測距を成立させるものである。海流により揺れ動く中継機の位置と、目的である海底の機器同士の相対位置の変化を同時に推定する複雑なプロセスに取り組み、最終的に直接測距と遜色のない精度で計測可能な解析手法を開発し、上記のように実海域での実証観測に活かすことに成功した。

この間接方式の観測手法の有用性が確かめられたことで、地形的な制約で海溝軸にほぼ限定されていた観測を、地形によらずに陸側へ延長することが可能になった。このように、沈み込み帯全域でのすべりの空間分布を計測する道が開けたことは、この研究分野への大きな貢献と言える。

これらのことは、自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。したがって、山本龍典提出の博士論文は、博士（理学）の学位論文として合格と認める。